



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
**de Colombia**

**COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA PARIO Y UN PROCEDIMIENTO  
TRADICIONAL PARA OBTENER LA GRANULOMETRÍA EN SUELOS FINOS**

**DIEGO ALEJANDRO MORALES GONZALES. CÓDIGO: 503873**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

**COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA PARIO Y UN PROCEDIMIENTO  
TRADICIONAL PARA OBTENER LA GRANULOMETRÍA EN SUELOS FINOS**

**DIEGO ALEJANDRO MORALES GONZALES. CÓDIGO: 503873**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR DE PROYECTO:  
INGENIERO CIVIL POSDOCTORADO EN EL ÁREA DE SUELO NO  
SATURADOS JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.**

**2018**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

**Usted es libre de:**



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## CONTENIDO

GLOSARIO.....	10
INTRODUCCIÓN.....	14
1. GENERALIDADES.....	15
1.1. ANTECEDENTES.....	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4. OBJETIVOS.....	18
1.4.1. Generales .....	18
1.4.2. Específicos .....	18
1.5. DELIMITACIÓN.....	18
1.5.1. Alcance.....	18
1.5.2. Limitaciones.....	19
2. MARCO DE REFERENCIA .....	20
2.1. MARCO TEÓRICO .....	20
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	22
2.2.1. Hidrómetro método tradicional. ....	22
2.2.2. Sistema Pario.....	28
2.3. MARCO HISTÓRICO .....	31
2.4. MARCO LEGAL .....	32
3. METODOLOGÍA .....	35
3.1. DETERMINACIÓN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR EL SISTEMA TRADICIONAL (MÉTODO DEL HIDRÓMETRO).....	36
3.1.1. Descripción.....	36

3.1.2. Materiales y equipos .....	40
3.2. DETERMINACIÓN DEL ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL SISTEMA PARIO.....	43
3.2.1. Descripción.....	46
3.2.2. Materiales y quipos .....	48
4. RESULTADOS.....	51
4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR EL SISTEMA TRADICIONAL (MÉTODO DEL HIDRÓMETRO) .....	51
4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL SISTEMA PARIO.....	53
4.2.1. Evaluación Y Exportación De Datos .....	55
4.2.2. Distribución De Partículas .....	56
4.2.3. Clase de texturas.....	56
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	58
5.1. RELACIÓN DE GRAFICAS MÉTODO TRADICIONAL POR HIDROMETRO.....	58
5.1. RELACIÓN DE GRAFICAS MAQUINA PARIO .....	58
5.1. 2 GRAFICA COMPARACION DE RESULTADOS SISTEMA PARIO VS MÉTODO TRADICIONAL POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO .....	59
6. RECOMENDACIONES.....	63
8. REFERENCIAS .....	65
9. ANEXOS.....	67
1. Resultados muestreos Curvas Granulométricas Método Del Hidrómetro	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fórmula para calcular densidad real de la solución. ....	23
Figura 2. Calculo de las fuerzas actuantes.....	23
Figura 3. Re escribiendo Cálculo de las fuerzas actuantes .....	24
Figura 4. Cálculo de la velocidad final de las partículas.....	24
Figura 5. Cálculo de la profundidad de asentamiento .....	25
Figura 6. Cálculo de la profundidad de asentamiento.....	25
Figura 7. Cálculo de la densidad real de la solución .....	26
Figura 8. Hidrómetro. ....	26
Figura 9. Cantidad de partículas de suelo en volumen dado la solución .....	27
Figura 10. Sistema PARIO.....	28
Figura 11. Calculo diámetro de las partículas .....	38
Figura 12. Diámetro de las partículas en suspensión. ....	39
Figura 13. Constante K.....	38
Figura 12. Agente Dispersivo. ....	38
Figura 13. Termómetro. ....	40
Figura 14. Cálculo del porcentaje más fino al tamaño. ....	40
Figura 15. Tamiz No.10. ....	41
Figura 16. Balanza. ....	41
Figura 17. Hidrómetro 152 H. ....	41
Figura 18. Cilindro de Sedimentación .....	42
Figura 19. Agente Dispersivo .....	42
Figura 20. Termómetro.....	42
Figura 21. Muestra Cal. ....	43
Figura 22. Sistema PARIO.....	45
Figura 23. Cilindro de Sedimentación .....	49
Figura 24. Muestra Cal. ....	49
Figura 25. Maquina Pario .....	49
Figura 26. Computador con el Software PARIO.....	50
Figura 27. Muestra Cal.....	53

Figura 28. Muestra Cal a dentro de la maquina PARIO.....	54
Figura 29. Análisis de la Maquina PARIO.....	54
Figura 30. Análisis del software del Sistema PARIO.....	55
Figura 31. Distribución de partículas Software PARIO.....	56
Figura 32. Diagrama de Barras Clasificación de muestra cal.....	56
Figura 33. Triangulo de Suelo.....	57

### **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Tabla de referencia de los materiales y elementos utilizados. ....	51
Tabla 2. Pesos de los elementos.....	51
Tabla 3. Resultados Obtenidos de la Muestra 1. ....	52
Tabla 4. Datos Específicos de la Cal. ....	52

### **LISTA DE GRAFICAS**

Grafica 1. Curva Granulométrica Muestra No 1. ....	57
Grafica 2. Curva Granulométrica Muestra No 2. ....	58
Grafica 3. Curva Granulométrica Muestra No 3. ....	59
Grafica 4. Curva Granulométrica Muestra No 4. ....	59



## ANEXOS

1. Resultados muestreos Curvas Granulométricas Método Del Hidrómetro .	67
1.1. Muestra No 1. Análisis Granulométrico de Suelos por Hidrómetro Norma i-n-v-e-123.	67
1.1.1. Curva Granulométrica.	68
1.2. Muestra No 2. Análisis Granulométrico de Suelos por Hidrómetro Norma i-n-v-e-123.	68
1.2.1. Curva Granulométrica.	69
1.3. Muestra No 3. Análisis Granulométrico de Suelos por Hidrómetro Norma i-n-v-e-123.	69

## **GLOSARIO**

### **Cálculo**

Considerar, reflexionar algo con atención y cuidado (RAE 2017).

### **Densidad**

Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo por metro cúbico (RAE 2017).

### **Desmineralizar**

Provocar que algo pierda sustancias minerales (RAE 2017).

### **Dispersión**

Sustancia aparentemente homogénea, en cuyo seno hay otra finamente dividida. (RAE 2017).

### **Distribución**

Reparto de un producto a los locales en que debe comercializarse (RAE 2017).

### **Fluido**

Dicho de una sustancia: Que se encuentra en estado líquido o gaseoso (RAE 2017).

### **Fracción**

Cada una de las partes separadas de un todo o consideradas como separadas(RAE 2017).

### **Gradación**

Disposición o ejecución de algo en grados sucesivos, ascendentes o descendentes (RAE 2017).

### **Granulometría**

Parte de la petrografía que trata de la medida del tamaño de las partículas, granos y rocas de los suelos (RAE 2017).

### **Hidrodinámica**

Rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos (RAE 2017).

### **Hidrómetro**

Instrumento que sirve para medir el caudal, la velocidad o la fuerza de las corrientes líquidas (RAE 2017).

### **Humedad**

Expresión porcentual de la cantidad de vapor de agua presente en el aire con respecto a la máxima posible para unas condiciones dadas de presión y temperatura (RAE 2017).

### **Medir**

Comparar una cantidad con su respectiva unidad, con el fin de averiguar cuántas veces la segunda está contenida en la primera (RAE 2017).

### **Método**

Procedimiento que se sigue en las ciencias para hallar la verdad y enseñarla (RAE 2017).

**Muestreo**

Acción de escoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo (RAE 2017).

**Partícula**

Parte pequeña de materia (RAE 2017).

**Permeabilidad**

Propiedad de algunos materiales de aumentar la densidad del campo magnético en su interior, que se expresa como el cociente entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético (RAE 2017).

**Pipeta**

Tubo de cristal ensanchado en su parte media, que sirve para trasladar pequeñas porciones de líquido de un vaso a otro. Tubo de varias formas cuyo orificio superior se tapa a fin de que la presión atmosférica impida la salida del líquido (RAE 2017).

**Porcentual**

Dicho de una composición, de una distribución, etc.: Calculadas o expresadas en tantos por ciento (RAE 2017).

**Roca**

Material sólido de origen natural formado por una asociación de minerales o por uno solo, que constituye una parte importante de la corteza terrestre (RAE 2017).

**Suelo**

1. Conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal

2. Superficie artificial que se hace para que el piso esté sólido y llano (RAE 2017).

### **Suspensión**

Dicho de una partícula o de un cuerpo: Que se mantiene durante tiempo más o menos largo en el seno de un fluido (RAE 2017).

### **Tamiz**

Cedazo muy tupido (RAE 2017).

### **Temperatura**

Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K) (RAE 2017).

### **Territorio**

Porción de la superficie terrestre perteneciente a una nación, región, provincia (RAE 2017).

### **Transporte**

Sistema de medios para conducir personas y cosas de un lugar a otro (RAE 2017).

### **Velocidad**

Magnitud física que expresa el espacio recorrido por un móvil en la unidad de tiempo, y cuya unidad en el sistema internacional es el metro por segundo (RAE 2017).

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación tiene como objetivo comparar dos sistemas para la obtención de la granulometría en suelos finos, a partir de la implementación de una nueva tecnología llamada PARIO que tiene como fin calcular la distribución del tamaño de partículas según la ley de Stokes (METER Group, 2018). Este método presenta unas funciones más eficientes debido a que nos ofrece un sistema inteligente reduciendo el tiempo de operación, mejorando su precisión y evitando errores de cálculo y lectura manual ya que no se requiere de la intervención humana.

Por otra parte, la Norma INV. E-124-07 (INVIAS, 2007) presenta el Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro donde también se basa en la distribución de partículas pequeñas obtenidas mediante la sedimentación de esta asciendo a diferentes velocidades dependiendo de su peso, forma y tamaño. Sin embargo, este sistema presenta ciertas falencias, por ejemplo: requieren de lectura manual constante y se deben realizar factores de corrección para mitigar los errores presentados por temperatura, calibración y agentes de dispersión.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la *“medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica”*(Tavera Mendoza, 2011).

En las primeras investigaciones académicas, acerca de las propiedades mecánicas de los suelos; se creyó que las mismas dependían de la distribución de sus partículas constituyentes según sus tamaños. Dentro de dichos análisis se encuentra el de granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un suelo. Para ello se emplean juegos de mallas bajo normas AASTHO y ASTM, o sea que utilizan tamaños graduados para obtener los pesos retenidos. Seguidamente se realizan los cálculos y la curva granulométrica.

La forma de los granos es independiente de la distribución de tamaños lo cual se puede observar. En la ingeniería se practica un método común para mostrar gráficamente las características textuales de un suelo, es por medio de una curva de distribución del tamaño de partículas (Tavera M, 2011).

De manera que, la distribución del tamaño de las partículas minerales en los suelos es de interés fundamental, teniendo en cuenta que está relacionado con casi todos los aspectos físicos y propiedades químicas que afecta el funcionamiento biológico y ecológico del suelo.

Es de resaltar que las partículas del suelo abarcan un rango de gran tamaño, que varía desde piedras y rocas, hasta arcillas submicrométricas. Por lo cual, ha sido necesario categorizar las principales clases de tamaños en arena S, limo U y arcilla C, y que, finalmente se dividen en categorías estándares de suelo “fino”, “medio” y “grueso” (Robinson, Sutton y Reid, 2014).

Este proceso se da, con el fin de determinar las proporciones de fracciones finas de limo y arcilla, por medio de experimentos de sedimentación. Los más comunes son los procesos con la pipeta y el método ter, ambos necesitan de un muestreo manual en momentos específicos; que requieren de mucho tiempo para desarrollar un análisis preciso del tamaño de la partícula.

Debido a esto se incorporó un nuevo método reconocido como la suspensión integral método seguro (ISP) para “el análisis preciso del tamaño de partícula por sedimentación gravitacional, desarrolló recientemente el método del método de suspensión integral (ISP), que se aplica en el dispositivo PARIOTM del grupo METER” (Miller et al., 2017).

Este nuevo método estima el PSD continuo de la sedimentación, mediante experimentos que registran la evolución temporal de la presión y de la suspensión a una cierta profundidad de medición en un cilindro de sedimentación, este procedimiento no requiere interacción manual después del inicio y, por lo tanto, no hay capacitación especializada del laboratorio personal.



## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El ensayo tradicional para la obtener la granulometría en suelos finos, tiene como objeto determinar y clasificar el porcentaje de partículas pequeñas. Es decir, partículas menores a 0,075 mm de diámetro, obtenidas mediante un proceso de sedimentación por medio del hidrómetro; no obstante, este método presenta algunos errores de precisión y esfuerzos mecánicos innecesarios debido a la intervención del hombre que dificultan el análisis preciso de nuestro suelo determinado.

En la actualidad existen unos factores de corrección suministradas por la Norma Colombiana del Instituto Nacional de Vías, tratando de mitigar los errores presentados por calibración, temperatura, agente de dispersión, entre otros. Dejando en evidencia la importancia de optar por nuevas tecnologías si se desea unos resultados con mayor precisión (INVIAS, 2007).

Partiendo de la problemática la interrogante planteada fue la siguiente:

**¿Según las comparaciones realizadas cuales son las similitudes y diferencias entre el sistema PARIO y un método tradicional?**

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

El ensayo de granulometría es de gran importancia para definir qué tipo de materiales se están manejando, y en que lo puedo utilizar para diferentes campos de la ingeniería. La determinación de la distribución del tamaño de partículas (ATP) es uno de los más comunes e importantes análisis dentro del campo de la física de suelos; es usado en análisis texturales para la clasificación de suelos con propósitos agronómicos e ingenieriles.

De igual manera, la determinación de la distribución del tamaño de partículas (ATP); también tiene una relación directa e indirecta con la distribución de suelos y, por tanto, con las propiedades de retención de humedad. Existe una amplia gama de métodos que permiten llevar a cabo este tipo de análisis, los cuales se identifican, generalmente, por el medio. Entre ellos tenemos: hidrómetro para el método mecánico de granulometría y sistema Pario.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Generales**

Realizar una comparación entre el sistema PARIO y un método tradicional por medio del Hidrómetro. Para lograr determinar cuál de los sistemas permite obtener mayor información del material en estudio.

### **1.4.2. Específicos**

- ✓ Determinar el porcentaje diferencial que se genera entre los sistemas en comparación, teniendo como evidencia mayor información de las micro partículas que se encuentran en la CAL.
- ✓ Analizar los resultados de la curva granulométrica del sistema PARIO y un método tradicional por hidrómetro; y la incidencia que puede tener esta el margen de error, de cada uno de los sistemas en comparación.

## **1.5. DELIMITACIÓN**

### **1.5.1. Alcance**

El presente trabajo culminará con la recolección de datos que brinde cada uno de los sistemas en comparación, para lograr determinar y clasificar las diferencias

existentes, entre las partículas del suelo; para ello se tendrá como referencia fracciones finas de limo y arcilla, con las cuales también se logra determinar el margen de error existente entre los dos sistemas.

Con el desarrollo del presente proyecto, se logrará aportar una fuente académica de rigurosidad entorno al Sistema Pario, teniendo en cuenta que en la actualidad no se han generado investigaciones; que aporten al conocimiento académico, aspectos como ventajas y desventajas, ante un análisis comparativo entre el sistema convencional y el sistema Pario.

### **1.5.2. Limitaciones**

El diagnostico comparativo entre el sistema convencional y el sistema Pario, se debe realizar en un laboratorio con elementos tecnificados, acorde a las exigencias de la presente investigación. Debido a esto, existe una limitación en aspectos como, ingreso y movilización a las instalaciones que cuenten con los recursos mencionados. Además de esto, como segunda limitante se encuentra, el tiempo asignado para el desarrollo del presente proyecto; de acuerdo con las exigencias por la Universidad Católica de Colombia.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1. MARCO TEÓRICO**

Según Durner, W; Iden, S y Unold, G (2017), la distribución del tamaño de partículas de los suelos es de interés fundamental, ya que este se relaciona con las propiedades físicas que afectan el funcionamiento biológico y ecológico del suelo. El análisis de esta distribución se toma mediante el tamaño y la separación de ciertas partículas que se clasifican según el suelo a estudiar. Es importante esta clasificación ya que por medio de ella se va a definir el comportamiento del suelo mediante de la sedimentación en una suspensión acuosa.

Según las normas INV E-124-07 (INVIAS, 2007), el hidrómetro es utilizado para precisar el porcentaje de partículas dispersas en la suspensión del suelo, mediante escalas que miden el peso, los gramos, el volumen, la temperatura, entre otras. La distribución de tamaños de partículas más grandes es de 75  $\mu\text{m}$  (retenidas en el tamiz No 200) que se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75  $\mu\text{m}$  se dan por un proceso de sedimentación, donde se toma en cuenta dos elementos importantes como lo es la separación de la muestra y los materiales. Así mismo para las normas INV E-124-07 (INVIAS, 2007), esto es importante ya que los parámetros que controlan el comportamiento mecánico se dan en muestras de cementación artificial insaturadas que producen algunas características de los suelos colapsables.

Un estudio realizado en Venezuela por Gabriels y Lobo L (2003), toma en cuenta diferentes métodos para el estudio del suelo por medio de fases que relacionan la composición mecánica con la materia orgánica, dichos estudios determinan la densidad que hay entre las características naturales del suelo, por su parte el método del hidrómetro determina los tamaños de las partículas de fracción del suelo midiendo la densidad del medio, por medio de métodos como la ASTM

(ASTM 2000) y el publicado por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (Gee y Or, 2002).

También toman en cuenta el método de la PIPETA, ya que siendo un antecedente del hidrómetro también *“mide el porcentaje del peso de cada tamaño de partícula que se encuentra en una suspensión de suelo/agua, después de la destrucción de la materia orgánica y de los agregados, así como la dispersión de las partículas de arcilla”*. (Gabriels y Lobo L, 2003); esto quiere decir que la dispersión en cada partícula debe especificar la suspensión en cuanto a la estabilidad, así que ambos procedimientos miden lo mismo con la diferencia que el método del hidrómetro no requiere tratamientos.

Esta dispersión puede completarse usando una combinación de químicos, para que sea más efectivo. *“En ambos métodos las separaciones de los grupos de particulares se fundamentan en la distinta velocidad de caída que tiene las partículas en un fluido”*(Gabriels y Lobo L, 2003); es decir, su velocidad de sedimentación al final obtiene las diferencias proporcionales correspondientes a las distintas clases de partículas, por cualquiera de los dos métodos.

Según Faroughi y Huber (2016), existe una relación directa entre el tamaño de partícula y otras propiedades del suelo, como algunos cambios de volumen por cortante, porosidad, permeabilidad y la conductividad. En la prueba del hidrómetro específicamente, se descuida las interacciones hidrodinámicas en las partículas que se sabe que dificultan la velocidad de sedimentación de los granos generando una subestimación en los diámetros.

Por lo tanto, ellos proponen una modificación hidrodinámica en la prueba del hidrómetro para analizar la textura de los suelos de grano fino. Basada en los análisis de tamizado e hidrómetro de la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales D6913-04 y D422-63 (ASTM D 422-63, 2007) .

Por otra parte, el Sistema PARIO, es el método más “eficiente” tomado en la actualidad, ya que este método reduce el tiempo de operación al tamaño de la partícula. Según METER Environment (METER Group, 2018), el Sistema PARIO es una operación convencional de análisis de tamaño de partículas del suelo que requiere mucho tiempo y energía, ya que el objetivo de este sistema es obtener resultados más precisos, mediante *“el cálculo de la distribución del tamaño de partículas, por medio de la ley de Stokes con un rango de tamaños de partículas de 63  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ ”*; es decir, este método permite la operación automatizada, para la reducción de errores, ya que no requiere inserción de un hidrómetro o un muestreo.

PARIO *“mide automáticamente en un intervalo de 10 segundos y registra continuamente el cambio de la presión de suspensión”* METER Environment (METER Group, 2018); ya que está basado en el hidrómetro y la pipeta, eso significa que no hay necesidad de correcciones específicas del suelo con funciones de transferencia como se requiere para casi cualquier otro método de medición automatizado.

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1. Hidrómetro método tradicional.**

Según Pérez, R (González et al. 2007), el hidrómetro es un instrumento que tiene como función la clasificación de suelos con propósitos agronómicos e ingenieriles, teniendo una relación directa e indirecta con la distribución de suelos y por tanto con las propiedades de retención de humedad.

El funcionamiento del hidrómetro de suelo la densidad total de la solución compuesta por agua, suelo y dispersante se calcula como:

Figura 1. Fórmula para calcular densidad real de la solución.

$$\rho_{total} = \frac{m_{total}}{V_{total}} = \frac{m_{H_2O} + m_s + m_{dis}}{V_{total}} \quad (11)$$

Fuente: (González et al. 2007).

El tiempo de lectura del hidrómetro depende del sistema de clasificación usado. La separación entre limo y arcilla, según la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelos (0,002 mm), por la que se rige Cuba, ocurre normalmente entre 8 y 12 horas de sedimentación, pero el tiempo exacto no puede ser identificado de antemano. Mediciones entre las 6 y las 8 horas y después entre las 12 y las 15 horas pueden dar una medida precisa de los por cientos de arcilla y limo.

## PRINCIPIO GENERAL DEL MÉTODO

Sobre una partícula de suelo en una solución líquida actúan dos fuerzas fundamentales. Una de las fuerzas,  $F_{ab}$ , dirigida hacia abajo, está dada por la diferencia entre el peso de la partícula de suelo y el líquido desplazado: (González et al. 2007)

Figura 2. Calculo de las fuerzas actuantes

$$F_{ab} = g(m_s - m_l)$$

Fuente: (González et al. 2007)

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $m_s$  y  $m_l$  son las masas de las partículas de suelo y del líquido desplazado, respectivamente. Considerando que la partícula tiene forma perfectamente esférica, la ecuación anterior puede ser escrita como: (González et al. 2007)

Figura 3. Re escribiendo Cálculo de las fuerzas actuantes

$$F_{ab} = \frac{1}{6} \pi g X^3 (\rho_s - \rho_l)$$

Fuente: (González et al. 2007)

Donde  $\rho_s$  y  $\rho_l$  son las densidades de suelo y del líquido respectivamente. Igualando ambas expresiones, se obtiene que la velocidad final de la partícula está dada por: (González et al. 2007)

Figura 4. Cálculo de la velocidad final de las partículas

$$v = g(\rho_s - \rho_l) X^2 / 18\eta$$

Fuente: (González et al. 2007)

Cuando se utiliza esta ecuación se asumen cuatro principios fundamentales, ellos son: (1) la velocidad  $v$  se alcanza tan pronto como comienza la decantación del suelo, (2) la decantación y la resistencia son enteramente debido a la viscosidad del fluido, (3) las partículas son lisas y esféricas y (4) no existe interacción entre partículas individuales. GIBBS et al. (1971) demostraron que las dos primeras consideraciones se cumplen para partículas menores de 80  $\mu\text{m}$  de diámetro. Como las partículas no son lisas y esféricas,  $X$  debe ser asumida como un diámetro equivalente. (González et al. 2007).

Del hidrómetro particular que se emplea, en cm. Su valor es una medida de la profundidad efectiva del asentamiento para partículas con diámetro  $X$  y se relaciona con la lectura del hidrómetro,  $R$ , dependiendo del diseño específico y la



forma del hidrómetro (ASTM, 1985). Esta relación puede ser aproximada según la expresión (GEE y OR, 2002): (González et al. 2007).

*Figura 5. Cálculo de la profundidad de asentamiento*

$$h' = L_1 + 1/2 (L_2 - V_B / A)$$

Fuente: (González et al. 2007)

Donde L1 (cm), es la distancia a lo largo del tallo del hidrómetro, desde la parte superior del bulbo hasta la marca correspondiente a la lectura del hidrómetro; L2 (cm), es el largo del bulbo del hidrómetro; VB (cm<sup>3</sup>), es el volumen del bulbo y A, es el área de la sección transversal del cilindro de sedimentación. El valor de 'h puede ser aproximado a su vez por la siguiente relación: (González et al. 2007).

*Figura 6. Cálculo de la profundidad de asentamiento*

$$h' = -0.164R + 16.3$$

Fuente: (González et al. 2007)

Ello es el resultado de considerar un hidrómetro ASTM 152H y un cilindro de sedimentación estándar: L1 =10,5 cm para una lectura, R, de 0 g L<sup>-1</sup>, y 2,3 cm para una lectura. R de 50 g L<sup>-1</sup>; L2 = 14,0 cm, Vb = 67,0 cm<sup>3</sup>; y A = 27,8 cm<sup>2</sup>. Cualquiera que sea la forma en que se aplica el método, el objetivo es obtener una relación entre el por ciento de partículas en suspensión y su diámetro. (González et al. 2007).

Con un hidrómetro de suelo se busca medir la cantidad de partículas de suelo en volumen dado de solución, ello se obtiene mediante la expresión:

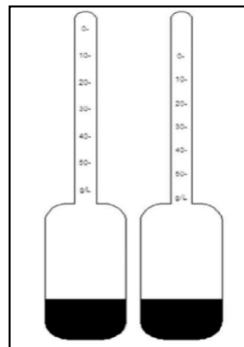
Figura 7. Cálculo de la densidad real de la solución

$$\rho_{total} = \rho_{H_2O} + \frac{m_s}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_s} \right) + \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{dis}} \right)$$

Fuente: (González et al. 2007)

La Figura 7 muestra de manera esquemática cómo quedaría la escala de densidad de suelos para un mismo hidrómetro, calibrado en una misma solución y con un mismo suelo, pero a dos temperaturas distintas. Para la temperatura menor, el valor de máxima densidad de suelos está desplazado hacia abajo y las líneas de división son más estrechas. (González et al. 2007).

Figura 8. Hidrómetro.



Fuente: (González et al. 2007).

El valor de la densidad de suelo en la solución es igual a la lectura del hidrómetro, R, solo cuando esta se efectúa en condiciones similares a las que fue calibrado el dispositivo. De ahí que la lectura que se obtiene debe ser generalmente corregida. Suponiendo que se realiza una lectura con el hidrómetro en un litro de solución T1

20 °C, y asumiendo que esa es la temperatura real de calibración del hidrómetro, se tiene: (González et al. 2007).

*Figura 9. Cantidad de partículas de suelo en volumen dado la solución*

$$\frac{m_s}{V_{total}} = R = \frac{\rho_{total} - \rho_{H_2O} - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{dis}} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_s} \right)}$$

Fuente: (González et al. 2007)

## TIEMPOS DE LECTURA MÁS EMPLEADOS

El tiempo de lectura del hidrómetro depende del sistema de clasificación usado. La separación entre limo y arcilla, según la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelos (0,002 mm), por la que se rige Cuba, ocurre normalmente entre 8 y 12 horas de sedimentación, pero el tiempo exacto no puede ser identificado de antemano. Mediciones entre las 6 y las 8 horas y después entre las 12 y las 15 horas pueden dar una medida precisa de los por cientos de arcilla y limo. Con el ánimo de reducir el tiempo de laboratorio, algunos investigadores han propuesto una variedad de tiempos de observación, los cuales permiten aproximarse al tamaño de partículas deseado a partir de un mecanismo de extrapolación. BOUYOUCOS (1962) sugirió que las lecturas a 40 segundos y 2 horas eran suficientes, pero GEE y BAUDER (1979) sostuvieron que 2 horas sobreestimaba la fracción arcilla y desarrollaron un método de medias ponderadas para el cálculo de la arcilla, llevando a cabo lecturas a 1,5 y 24 horas. PATRICK (1958) usó 35 segundos y 8 horas. (González et al. 2007).

Sin embargo, ASTM (1972) también recomendó 2; 5; 15 y 30 minutos y 1; 4 y 24 horas, y la 2da edición del Manual de Métodos Estándares (GEE y BAUDER, 1986) cita 30 y 60 segundos, 3; 10 y 30 minutos y 1; 1,5; 2 y 24 horas. Para salvar

tiempo de laboratorio y hacer más expeditos los análisis, algunos laboratorios llevan a cabo una lectura entre 6 y 8 horas. (González et al. 2007).

### **2.2.2. Sistema Pario**

Según METER Environment (METER Group, 2018), Calcula la distribución del tamaño de partícula según la ley de Stokes, con un rango de tamaños de partícula de 63  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ . Mide automáticamente en un intervalo de 10 segundos y registra continuamente el cambio de la presión de suspensión, así como la temperatura.

*Figura 10. Sistema PARIO*



Fuente: (METER Group, 2018).

## **EL NUEVO DISPOSITIVO PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS**

La distribución del tamaño de partícula (PSD) es una propiedad clave de los suelos. El método de referencia para determinar la PSD es basado en la sedimentación gravitacional de partículas en una suspensión inicialmente homogénea. Métodos tradicionales miden manualmente (i) la elevación de un cuerpo flotante en la suspensión en diferentes momentos (método del hidrómetro) o la masa de sólidos en alícuotas de suspensión extraída a profundidades y tiempos de muestreo predefinidos (método de pipeta). Ambos métodos conducen a una perturbación del proceso de sedimentación y proporcionan solo datos discretos de la PSD. Durner et al. (2017) desarrollaron recientemente un nuevo método automatizado para determinar las distribuciones del tamaño de partícula

de Suelos y sedimentos de la sedimentación gravitacional (Durner, W., S.C. Iden y G. von Unold: La suspensión integral Método de presión (ISP) para un análisis preciso del tamaño de partícula por sedimentación gravitacional, Recursos hídricos.

PSD continuos de experimentos de sedimentación al registrar la evolución temporal de la presión de suspensión a una cierta profundidad de medición en un cilindro de sedimentación. No requiere interacción manual después del inicio y por lo tanto no hay formación especializada del personal de laboratorio y evita cualquier perturbación del proceso de sedimentación. La tecnología requerida para realizar estos experimentos fue desarrollada por la compañía UMS, Munich y ahora está disponible como un instrumento llamado PARIO, comercializado por el Grupo METER. En este cartel, el funcionamiento básico. Se muestra de PARIO y se explican los componentes y parámetros clave de la tecnología.

**PARIO:** es un sistema automatizado para el análisis del tamaño de partículas (PSA) para suelos y sedimentos La distribución del tamaño de partícula (PSD) de los materiales granulares se obtiene mediante la método de sedimentación, que identifica específicamente las fracciones de limo con hidrodinámica. Diámetros entre 63  $\mu\text{m}$  (límite de tamaño superior) y 2  $\mu\text{m}$  (límite de tamaño inferior). La fracción de arcilla se calcula restando las fracciones de arena medidas externamente y la fracción de limo A partir de la cantidad total de material utilizado en el análisis. Los datos para las fracciones de arena son proporcionados por un análisis de tamiz. Preferiblemente, este análisis se obtiene independientemente y antes del análisis PARIO a partir de una muestra dividida. (METER Group, 2018).

### **Fundamentos del Método de Sedimentación**

El método de sedimentación se basa en el análisis de la sedimentación gravitacional de las partículas en un fluido. Un disperso la suspensión del suelo se

transfiere a un cilindro de sedimentación, se llena hasta un volumen definido y se agita y / o agitado para obtener una distribución uniforme de partículas. Después de agitar, agitar o girar el cilindro, el fluido se detiene y las partículas en la suspensión caen con una velocidad de asentamiento que está relacionada con su tamaño. Dependiendo de la distribución del tamaño de las partículas, su concentración a cualquier profundidad de la suspensión del suelo disminuye continuamente con el tiempo, porque las partículas de sedimentación de mayor tamaño que un cierto tamaño han pasado la profundidad. Todos los métodos de sedimentación suponen que la sedimentación de las partículas minerales se puede describir adecuadamente por la ley de Stokes [Stokes, 1850]. Sobre esta base, el "diámetro equivalente" de una partícula se define como el diámetro de una Esfera de la misma densidad que se asienta con la misma velocidad vertical en la suspensión subyacente. Las suposiciones o condiciones necesarias son las siguientes [ISO 13317-1, 2001]: (i) Las partículas son rígidas, lisas esferas, (ii) las partículas se depositan en el flujo laminar, es decir, el número de Reynolds es menor que 0.2, (iii) la suspensión de las partículas se diluye lo suficiente como para asegurar que las partículas no interfieran entre sí durante la sedimentación, (iv) no hay interacción entre las partículas y el líquido, (v) el diámetro del cilindro de suspensión es grande en comparación con el diámetro de las partículas, (vi) todas las partículas alcanzan su velocidad terminal inmediatamente, y (vii) la densidad de partículas es la misma para todas las partículas, es decir, independientemente del diámetro. Como lo muestra Gee y Or [2002], suelo las partículas alcanzan su velocidad terminal casi de inmediato y el supuesto (vi) se justifica así. La ley de Stokes describe la velocidad de sedimentación terminal  $v$  (m s<sup>-1</sup>) de partículas esféricas en función de su diámetro  $D$  (m). (Durner, W., S. C. Iden, and G. von Unold 2017).

### 2.3. MARCO HISTÓRICO

A lo largo de la historia de la humanidad, el hombre ha buscado la manera de explotar los recursos naturales en pro de su supervivencia, es así como surge el estudio del proceso de los agregados; el cual se remota a la actividad gestada desde el interior de la tierra a través de las eras *“geológicas que han llevado a cambios en la formación y transformación de las rocas que se utilizan hoy en la elaboración de concreto u hormigón, mezclas asfálticas y estructuras de los pavimentos”*. (Construdata, 2018).

A partir del siglo XVIII, los problemas relacionados con las cimentaciones y otros aspectos geotécnicos son estudiados de una forma más metódica; esto relacionado a la necesidad del hombre de estudiar las leyes naturales y comprenderlas a través de la observación cuidadosa de las rocas desde su estado natural hasta sus medios de uso.

Posteriormente en el siglo XX las escuelas pragmáticas concluyeron que las propiedades mecánicas del suelo dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello los académicos en esta área, se enfocaron en la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución. Con suficiente experiencia, es posible deducir las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o descripción por tamaños (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1967).

Ya en la actualidad se desarrollaron diversos métodos para la caracterización granulométrica de una muestra de suelos, en donde se encuentran dos líneas investigación; una netamente enfocada al estudio del método de tamizado para gruesos y otra en los procesos que se deben dar en el hidrómetro para suelos finos. Estos procesos se orientan en hacer pasar *“una muestra de suelo seco por un arreglo de tamices organizados de mayor a menor tamaño de abertura de tal*

*forma que van quedando retenidos en cada uno las partículas con un diámetro menor a la abertura del tamiz anterior y mayor al del tamiz en el que están retenidas” (Zalazar, 2015), de esta forma es posible determinar el porcentaje de masa de cada uno de los tamaños de grano.*

## **2.4. MARCO LEGAL**

La Constitución política de Colombia: Artículo 313, parágrafo No. 7 “*Reglamentar los usos del suelo y, dentro de los límites que fije la ley, vigilar y controlar las actividades relacionadas con la construcción y enajenación de inmuebles destinados a vivienda*” (Corte Constitucional de Colombia, 1991).

La Ley 388 de 1997 (Congreso de la Republica de Colombia 1997), indica en los artículos 21, 31 y 32 lo siguiente:

*Art. 21 “Armonía con el plan de desarrollo del municipio. El plan de ordenamiento territorial define a largo y mediano plazo un modelo de ocupación del territorio municipal y distrital, señalando su estructura básica y las acciones territoriales necesarias para su adecuada organización, el cual estará vigente mientras no sea modificado o sustituido. En tal sentido, en la definición de programas y proyectos de los planes de desarrollo de los municipios se tendrán en cuenta las definiciones de largo y mediano plazo de ocupación del territorio”.*

*Art. 31 “Suelo urbano. Constituyen el suelo urbano, las áreas del territorio distrital o municipal destinadas a usos urbanos por el plan de ordenamiento, que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, posibilitándose su urbanización y edificación, según sea el caso. Podrán pertenecer a esta categoría aquellas zonas con procesos de urbanización incompletos, comprendidos en áreas consolidadas con edificación, que se definan como áreas de mejoramiento integral en los planes de ordenamiento territorial”.*



*Art. 32 “Suelo de expansión urbana. Reglamentado parcialmente por el Decreto Nacional 2181 de 2006. Constituido por la porción del territorio municipal destinada a la expansión urbana, que se habilitará para el uso urbano durante la vigencia del plan de ordenamiento, según lo determinen los Programas de Ejecución. La determinación de este suelo se ajustará a las previsiones de crecimiento de la ciudad y a la posibilidad de dotación con infraestructura para el sistema vial, de transporte, de servicios públicos domiciliarios, áreas libres, y parques y equipamiento colectivo de interés público o social. Dentro de la categoría de suelo de expansión podrán incluirse áreas de desarrollo concertado, a través de procesos que definan la conveniencia y las condiciones para su desarrollo mediante su adecuación y habilitación urbanística a cargo de sus propietarios, pero cuyo desarrollo estará condicionado a la adecuación previa de las áreas programadas”.*

Adicionalmente, se encuentra el Decreto ley 216 de 2003, en los artículos 1, 2 parágrafo No.1, 16 parágrafo 5 y 15 en el cual se reglamenta:

*Art. 1. “Objetivos. El Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, tendrá como objetivos primordiales contribuir y promover el desarrollo sostenible a través de la formulación y adopción de las políticas, planes, programas, proyectos y regulación en materia ambiental, recursos naturales renovables, uso del suelo, ordenamiento territorial, agua potable y saneamiento básico y ambiental, desarrollo territorial y urbano, así como en materia habitacional integral” (Congreso de la Republica de Colombia, 1969).*

*Art. 2 – Parágrafo No 1. “Formular, dirigir y coordinar las políticas, regulación, planes y programas en materia habitacional integral, de desarrollo territorial, agua potable y saneamiento básico, y ambiental, uso del suelo y ordenamiento territorial”.*

Art.16 - Parágrafo No 5. *“Formular políticas y regulación nacionales sobre zonificación y uso adecuado del suelo y desarrollar metodologías e instrumentos para su transferencia y aplicación”.*

Parágrafo No 15. *“Apoyar el montaje e implementación de los observatorios del suelo y del mercado inmobiliario y de los observatorios ambientales urbanos en los Municipios y Distritos del país”.*

En último lugar, se encuentra la resolución 0170 de 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual en ejercicio de sus facultades legales; se pronuncia, para reiterar la implementación de la Norma IBIDEM de la siguiente manera:

Art. 179 Norma Ibidem *"El aprovechamiento de los suelos deberá efectuarse en forma de mantener su integridad física y su capacidad productora. En la utilización de los suelos se aplicarán normas técnicas de manejo para evitar su pérdida o degradación, lograr su recuperación y asegurar su conservación"* (González C, 2007).

Art. 180 de la norma citada, *"Es deber de todos los habitantes de la República colaborar con las autoridades en la conservación y en el manejo adecuado de los suelos. Las personas que realicen actividades agrícolas, pecuarias, forestales o de infraestructura, que afecten o puedan afectar los suelos, están obligadas a llevar a cabo las prácticas de conservación y recuperación que se determinen de acuerdo con las características regionales:*

- A. Velar por la conservación de los suelos para prevenir y controlar, entre otros fenómenos, los de erosión, degradación, salinización o revenimiento (...).*
- B. Coordinar los estudios, investigaciones y análisis de suelos para lograr su manejo racional.*

### **3. METODOLOGÍA**

La presente investigación iniciará con un análisis documental, a partir de fuentes secundarias que permitan, la selección de datos procedentes de libros, revistas académicas, informes de entidades públicas como INVIAS e investigaciones precedentes a la actual, con las cuales se pueda determinar una clasificación diferencial teórico entre el Sistema Pario y un Procedimiento Tradicional.

Adicionalmente, se realizará un análisis descriptivo donde se establezcan aquellas características y propiedades más representativas, entre el Sistema Pario y el Procedimiento Tradicional, por medio de una descripción detallada de las partes de manera categórica.

Posteriormente de tener la clasificación documental y la categorización teórica, se realizarán pruebas estandarizadas que expongan una posible relación de causa y efecto en el resultado final; en donde se establezca el nivel de influencia y las modificaciones que sufre el suelo fino, con la intervención del Sistema Pario y el Procedimiento Tradicional. Esto se dará por medio de, una exploración experimental en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia; efectuando dos ensayos de laboratorio, uno por cada uno de los tipos de suelo, en este caso limos y arcillas.

Esta investigación finalizará con un análisis e interpretación de datos, en el cual se identifique con cuál de los dos procedimientos es más efectivo, la obtención de la granulometría en suelos finos a partir del limo y la arcilla.

### **3.1.DETERMINACIÓN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR EL SISTEMA TRADICIONAL (MÉTODO DEL HIDRÓMETRO)**

#### **3.1.1. Descripción**

Para la realización del ensayo se sacaron 5 muestras de material (Cal), las cuales fueron evaluadas con un Hidrómetro 152 H. y según la norma I.N.V. E-124-07 (INVIAS, 2007).

Se tuvo en cuenta la información existente para identificar qué tipo de muestra se está trabajando como (No. De la muestra y Nombre). Determinando la gravedad específica de los sólidos, Gs, (Norma I.N.V. E -128). Se colocó la muestra en una cápsula de 250 ml, agregando agua destilada hasta que la muestra quede totalmente sumergida. En ese momento se agrega un agente dispersante: 125 ml de solución hexametáfosfato de sodio (40g/l). Dejando la muestra en remojo por una noche hasta que los terrones de suelo se hayan desintegrado. Se transfiere la muestra con agua, de la cápsula a un vaso de dispersión, lavando cualquier residuo que quede en la cápsula con agua destilada o desmineralizada.

Se coloca el vaso de dispersión en el aparato agitador durante el tiempo de un minuto. Luego de completado el período de dispersión, se cierra la válvula hasta obtener una presión de 6.9 kPa (1 psi). Removiendo la tapa y se lavan todas las partículas adheridas a las paredes. La válvula se deberá cerrar totalmente cuando la suspensión se transfiera al cilindro de sedimentación. Antes de tomar el cilindro de sedimentación, se agita vigorosamente para retirar los sedimentos que quedan en el fondo y obtener una suspensión uniforme. Colocando el cilindro sobre una mesa, pusimos en marcha el cronómetro. Introducimos lentamente el hidrómetro en la suspensión.

Se debe tener mucho cuidado cuando se introduce y cuando se extrae, para evitar perturbar la suspensión. Se anota los resultados al minuto, y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa. Se extrae el hidrómetro cuidadosamente colocándolo en un cilindro graduado con agua limpia. Sin dejar pasar mucho tiempo volvemos a poner el hidrómetro en la suspensión para tomar las lecturas a los 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos del inicio de la sedimentación. Después de cada lectura siguiente, se coloca un termómetro en la suspensión, para tomarle la temperatura.

Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

- ✓ Corrección por menisco ( $C_m$ ): La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado, y se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. Valores corrientes de  $C_m$  son:

Hidrómetro tipo 152 H:  $C_m = 1,0$  g/litro

- ✓ Corrección por temperatura ( $C_t$ ): a cada una de las lecturas de hidrómetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura.
- ✓ Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero.
- ✓ ( $C_d$ ): La corrección por defloculante se determina generalmente en conjunto con la corrección por punto cero; por ello se les denomina "corrección por defloculante y punto cero". El procedimiento es; Se selecciona un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad y se llena con agua destilada o desmineralizada con una cantidad de defloculante igual a

la que se empleará en el ensayo. Se realiza, en la parte superior del menisco, la lectura del hidrómetro y, a continuación, se introduce un termómetro para medir la temperatura de la solución. Se calcula la corrección por defloculante y punto cero (Cd) mediante la fórmula:

$$Cd = t' + Cm \pm Ct$$

Fuente: Corrección por agente de dispersión (INVIAS, 2007).

$t'$  = lectura del hidrómetro, en agua con defloculante únicamente.

$Cm$  = corrección por menisco.

$Ct$  = corrección por temperatura, sumada algebraicamente.

Según la Norma I.N.V 124 – 07 (INVIAS 2007) Se deberán emplear los siguientes cálculos para la determinación de la curva granulométrica:

- ✓ **Lectura de hidrómetro corregida:** Se calculan las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R), sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida (R'), la corrección por menisco  $Cm$ . o sea:

$$R = R' + Cm$$

Fuente: Lectura de hidrómetro corregida (INVIAS, 2007).

- ✓ **Cálculo del diámetro de las partículas (D):** El diámetro máximo, D, de las partículas en suspensión correspondiente el porcentaje indicado por una lectura en el hidrómetro debe ser calculado usando la Ley de Stokes.

*Figura 11. Calculo diámetro de las partículas*

$$D = \sqrt{\left[ \frac{30\eta}{981 (G_s - 1)\gamma_w} \right] \times \frac{L}{T}}$$

Fuente: (INVIAS, 2007).

D = diámetro máximo del grano en milímetros

h = coeficiente de viscosidad del medio de suspensión (en este caso agua) en Pa.s. Varía con cambios en el medio de suspensión.

L = distancia desde la superficie de la suspensión hasta el nivel al cual la densidad de la suspensión está siendo medida, en mm. (Para un hidrómetro y un cilindro de sedimentación dados, los valores varían de acuerdo con las lecturas del hidrómetro.

T = tiempo transcurrido desde el comienzo de la sedimentación hasta la toma de la lectura, en minutos.

Gs = gravedad específica de las partículas de suelo.

Wg = gravedad específica del agente de suspensión. (aprox. 1.0 para el agua).

- ✓ **Ley de Stokes:** considera la velocidad final de una única esfera que cae en una cantidad ilimitada de líquido, los tamaños calculados representan el diámetro de esferas que caerían a la misma velocidad que las partículas de suelos. El diámetro de las partículas de suelo en suspensión en el momento de realizar cada lectura de hidrómetro se puede calcular también con la fórmula siguiente:

*Figura 12. Diámetro de las partículas en suspensión.*

$$D \text{ (mm)} = K \sqrt{\frac{L}{T}}$$

Fuente: (INVIAS, 2007).

L = profundidad efectiva en mm.

T = tiempo transcurrido en minutos.

Figura 13. Constante K

$$K = \sqrt{\left[ \frac{30\eta}{981 (G_s - 1)\gamma_w} \right]}$$

Fuente: (INVIAS, 2007).

K = constante para facilitar el cálculo, la cual depende del valor de la gravedad específica del suelo y de la temperatura de la suspensión.

✓ Para el porcentaje más fino:

✓

Figura 14. Cálculo del porcentaje más fino al tamaño.

$$\% \text{ más fino} = \frac{R_{\text{corregida}} \times \alpha}{W_o} \times 100$$

$$\alpha = \frac{2.6500 - 1.000}{2.6500} \times \frac{G_s}{G_s - 1.000}$$

Fuente: (INVIAS, 2007).

G<sub>s</sub> = gravedad específica de los sólidos (Norma I.N.V. E – 222).

W<sub>o</sub> = masa de la muestra de suelo secado al horno que se empleó para el análisis del hidrómetro.

a = Factor de corrección por gravedad específica.

### 3.1.2. Materiales y equipos

- ✓ Tamices No. 10 y No.200
- ✓ Balanza con sensibilidad de 0.1 gramo.
- ✓ Hidrómetro 152H.



- ✓ Cilindro de sedimentación de 1000 cm<sup>3</sup>.
- ✓ Agente dispersivo (hexametáfosfato sódico, Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>40</sub>).
- ✓ Termómetro.
- ✓ Muestra representativa del suelo.

*Figura 15. Tamiz No.10.*



Fuente: Autor.

*Figura 16. Balanza.*



Fuente: Autor.

*Figura 17. Hidrómetro 152 H.*



Fuente: Autor.

*Figura 18. Cilindro de Sedimentación.*



Fuente: Autor.

*Figura 19. Agente Dispersivo*



Fuente: Autor.

*Figura 20. Termómetro.*



Fuente: Autor.

*Figura 21. Muestra Cal*



Fuente: Autor.

### **3.2. DETERMINACIÓN DEL ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL SISTEMA PARIO**

La distribución del tamaño de partícula (PSD) es una de las principales propiedades de los suelos. Para determinar las proporciones de la Fracciones finas limo y arcilla, se utilizan experimentos de sedimentación. Los más comunes son la pipeta y el método hidrómetro. Ambos necesitan muestreo manual en momentos específicos. Ambos son, por lo tanto, exigentes en el tiempo y dependen de la experiencia. Operadores Durner et al. (Durner, W., S.C. Iden y G. von Unold (2017): La presión de suspensión integral Método (ISP) para el análisis preciso del tamaño de partícula por sedimentación gravitacional, Water Resources Research, doi: 10.1002 / 2016WR019830) recientemente se desarrolló el método del método de suspensión integral (ISP), que se implementó en el dispositivo METRO Grupo PARIO. Este nuevo método estima PSDs continuos de sedimentación experimentos mediante el registro de la evolución temporal de la presión de suspensión a una cierta profundidad de medición en Un cilindro de

sedimentación. No requiere interacción manual después del inicio y, por lo tanto, no hay capacitación especializada del personal en el laboratorio. El objetivo de este estudio fue probar la precisión y la precisión de un nuevo método con una variedad de materiales.

En este caso se utilizó Cal, el cual se va a analizar su comportamiento por medio del sistema PARIO. Se realizaron repetidamente las mismas muestras en un laboratorio de temperatura controlada para caracterizar la repetitividad de las mediciones. Posteriormente, las muestras se investigaron mediante el método de la pipeta para validar los resultados. Que el error estadístico para la fracción de limo de las mediciones repetidas y repetidas estaba en el rango del 1% para el Material de cuarzo al 3% para materiales del suelo.

Dado que las fracciones de arena, como en cualquier método de sedimentación, deben ser medidas explícitamente y se utilizan como parámetros fijos en la evaluación PARIO, se determina el error de la fracción de arcilla Por propagación de error de la fracción de arena y limo. Homogeneización de la suspensión por agitación superior. Menor reproducibilidad y fracciones de limo más pequeñas que la agitación vertical. Sin embargo, resultó que la agitación vertical Debe realizarse con suficiente rigor para obtener una distribución inicial totalmente homogénea. Análisis de material cribado a  $<2000\text{ m}$  y  $<200\text{ m}$  dio los mismos resultados, es decir, no hubo indicios de efectos de arrastre de grandes partículas La eliminación completa de la fracción de arena, es decir, el tamizado a  $<63\text{ m}$  conduce a menos limo, probablemente debido a una pérdida de Material fino por el proceso de tamizado.

## **PRINCIPO DE MEDICION**

PARIO usa la PSD para derivar la distribución del tamaño de partícula (PSD) de la presión disminuir a una profundidad de medición en una suspensión. Se publica

la teoría del método. Por Durner et al. (2017). La metodología de la sedimentación sigue los requisitos de la norma ISO 11277, 2009; ISO 13317, 2001; ASTM, 2007 y se basa en la ley de Stokes. La ley de Stokes indica que las partículas de forma esférica asentarse en una suspensión con una velocidad característica que viene dada por la viscosidad del fluido, a diferencia de densidad entre el material de partículas, el fluido de suspensión, y el diámetro de la partícula.

La preparación de la suspensión con las partículas a analizar implica destrucción. De materia orgánica y posiblemente agentes aglutinantes, y dispersión del material. Esto es no se describe aquí, porque el usuario lo hace exactamente de la misma forma en que se usa en los métodos tradicionales. Usuarios nuevos que no tienen experiencia en realizar Los experimentos de sedimentación para PSA se refieren a los protocolos de operación respectivos. METER Group, 2018)

El método de medición PARIO se basa en el método bien establecido de hidrómetro o pipeta. Eso significa que no hay necesidad de correcciones específicas del suelo con funciones de transferencia como se requiere para casi cualquier otro método de medición automatizado, como la difracción láser o el análisis de imágenes.

*Figura 22. Sistema PARIO.*



Fuente: (METER Group, 2018)

El dispositivo PARIO consiste en un sensor de presión en la punta de un eje, que está conectado a una cabeza de medición. El eje está sumergido en una suspensión con partículas de sedimentación. Al lado del transductor de presión hay un sensor de temperatura. La presión y las señales de temperatura se

procesan en el cabezal de medición en la parte superior de la sedimentación. Cilindro. Las señales se transfieren en formato digital a través de una conexión USB a una PC. En modo de muestreo de datos, un triple de datos (tiempo, presión temperatura) se registra cada 10 Segundos a la PC. (METER Group, 2018).

## **INSTRUCCIONES DE USO**

1. El dispositivo solo debe ser utilizado en laboratorios.
2. El dispositivo debe colocarse sobre una superficie horizontal, libre de vibraciones y sólida.
3. ¡Evite la exposición directa a la luz solar en cualquier momento!
4. Evite colocar debajo del aire acondicionado o una ventana con aire frío.
5. Las muestras, el dispositivo y el líquido de suspensión deben equilibrarse a temperatura ambiente. La temperatura ambiente debe ser constante a  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ . Si es posible, use una temperatura controlada Coloque o coloque los cilindros de sedimentación en un lugar con temperatura controlada. Baño de agua.

**IMPORTANTE:** los puntos 2, 3 y 4 son estrictamente necesarios para evitar el control incontrolado. Fluctuaciones de temperatura, las fluctuaciones de temperatura afectarán fuertemente la precisión, de los resultados de medición.

### **3.2.1. Descripción**

Para la realización de este procedimiento, se utilizaron 5 muestras del mismo material de (Cal) que se utilizó en el sistema tradicional, para su debida comparación, entre los dos sistemas granulométricos por medio del hidrómetro.

Se prepara el experimento de sedimentación en un cilindro, de sedimentación exactamente de la misma manera que se hace normalmente, para un análisis de pipeta o hidrómetro. La preparación del material sigue las necesidades del usuario. La cantidad de sedimento que se utilizará en un experimento PARIO ©

debe estar en el rango de 25 g (material sin arena) hasta 50 g (material con mucha arena). Si no se sabe nada sobre el contenido de arena, recomendamos utilizar 30 g de peso seco. Sea preciso con respecto al peso seco del material a sedimentar: ¡la precisión del análisis depende de ello! Llenar un cilindro con 1 litro de agua templada destilada y taparlo. Coloque la muestra de suelo en el segundo cilindro y use agua templada destilada para llenarla hasta la marca de un litro.

Conecte todos los PARIO usados a la computadora e inicie el software. Los dispositivos deben parpadear en blanco. Si no, vuelva a conectarlos y conéctelos nuevamente.

Seleccione "Nueva medición". Los siguientes parámetros están predeterminados y se pueden cambiar manualmente si se desea:

- ✓ "Duración": 6 h
- ✓ Densidad de partículas": 2.65 g / cm<sup>3</sup>

Deben introducirse los siguientes parámetros: Nombre de la muestra - el nombre del archivo se generará automáticamente y se puede cambiar manualmente, volumen de suspensión, masa de partículas, masa de dispersante. Los valores que ha ingresado se guardan como ajustes predeterminados para todas las mediciones siguientes. Aun así, se pueden cambiar manualmente en los parámetros o directamente en la configuración predeterminada en cualquier momento. También se pueden desactivar en "Configuración", "Usar parámetros predeterminados para nuevas mediciones". Cuando se ingresan todos los parámetros necesarios, el estado cambia a verde, aparece una marca de verificación y se puede seleccionar el botón "Inicio".

Para iniciar una medición, presione el botón de “inicio” para la muestra seleccionada en la “ventana de preparación” de PARIO Control. Esto inicializa la cuenta atrás para mezclar. La cuenta atrás se debe establecer en 60 segundos como mínimo y se puede configurar en la configuración general. Durante la cuenta atrás, mezcle la suspensión a fondo. Esto se puede hacer ya sea girando el cilindro al revés (que debe cubrirse con el tapón hermético incluido) o agitando verticalmente vigorosamente con un agitador adecuado (típicamente una placa con aberturas al final de una barra).

## **FIN DE UNA MEDICIÓN**

Una medición finaliza automáticamente cuando termina la duración introducida. Alternativamente, un usuario puede detener una medición en cualquier momento haciendo clic en el botón respectivo en el software PARIO ©. Cuando se detiene la medición, aparece en la pestaña "Finalizado". Para el almacenamiento a corto plazo (la siguiente medición en un par de días), simplemente retire el PARIO © de la suspensión y vuelva a colocarlo en el cilindro con agua destilada. Si es necesario, enjuague el eje del PARIO © con un chorro suave de agua. Además, puede limpiar el eje con un paño suave.

### **3.2.2. Materiales y quipos**

- ✓ Cilindro de sedimentación.
- ✓ Sistema Pario.
- ✓ Material del suelo (Cal).
- ✓ Computador con el software Pario instalado.



*Figura 23. Cilindro de Sedimentación*



Fuente: Autor.

*Figura 24. Muestra Cal*



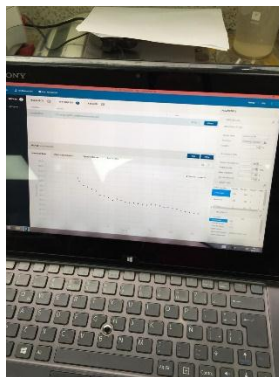
Fuente: Autor.

*Figura 25. Maquina Pario*



Fuente: Autor.

*Figura 26. Computador con el Software PARIO.*



Fuente: Autor.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR EL SISTEMA TRADICIONAL (MÉTODO DEL HIDRÓMETRO)

De acuerdo con la norma Invia I.N.V E 124 -07 y resultados obtenidos por medio del hidrómetro se genera las siguientes tablas a consecuencia de las fórmulas empleadas.

**Tabla No 1.** Datos generales de los materiales y elementos utilizados.

*Tabla 1. Tabla de referencia de los materiales y elementos utilizados.*

MUESTRA	CAL1
HIDRÓMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO
TAMAÑO MÁXIMO	
CILINDRO	1000 ml

Fuente: Autor.

**Tabla No 2.** Pesos de los elementos: se pesa el recipiente solo, en la balanza y se anota el resultado en gramos, se hace lo mismo con el recipiente más el suelo seco, después se pesa el suelo seco más la solución, y por último al suelo seco se le resta la cantidad de solución para obtener el peso del suelo seco inicial.

*Tabla 2. Pesos de los elementos.*

RECIPIENTE #	121
PESO RECIPIENTE (g)	112.83
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	170.90
PESO SUELO SECO + SOLUCIÓN	58.07
PESO SUELO SECO W0	53.07

Fuente: Autor.

**Tabla No 3.** Se toman los resultados de los cálculos obtenidos de acuerdo con las fórmulas mencionadas en la descripción del procedimiento, para luego ser anotados en esta tabla, la cual nos permite graficar la curva Granulométrica que pasa por el tamiz 200, reflejando los porcentajes de materiales finos, arcillas, limos, y arenas que se puedan presentar en la muestra tomada en el laboratorio. Teniendo en cuenta cada corrección en las fórmulas para obtener un resultado más acertado, tomando la lectura en cada tiempo como se referencia en la tabla.

*Tabla 3. Resultados Obtenidos de la Muestra 1.*

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	53	8	0.9	9.9	44.1	7.60	0.01381	0.0381	85.59
2	23	51	8	0.9	9.9	42.1	7.90	0.01381	0.0274	81.71
5	22	48	8	0.6	9.6	39.4	8.40	0.01397	0.0181	76.47
15	22	18	8	0.6	9.6	9.4	13.30	0.01397	0.0132	18.24
30	21	13	8	0.3	9.3	4.7	14.20	0.01414	0.0097	9.12
60	20	13	8	0	9	5	14.20	0.01431	0.0070	9.70
120	20	12	8	0	9	4	14.30	0.01431	0.0049	7.76
240	20	12	8	0	9	4	14.30	0.01431	0.0035	7.76
1440	20	11	8	0	9	3	14.50	0.01431	0.0014	5.82

Fuente: Autor.

#### **Tabla No 4. Datos**

*Tabla 4. Datos Específicos de la Cal.*

Cm	1
Gs	2.51
ALFA	1.030
W0	53.07

Fuente: Autor.

#### 4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL SISTEMA PARIO.

Para realizar el ensayo, hay que estar seguros de que la temperatura que se va a mantener en el laboratorio sea constante, para que ninguno de los materiales, no tenga algún cambio considerable que afecte los resultados, a la hora que el sistema haga el cálculo sistematizado. Los pasos teniendo en cuenta lo establecido en la I.N.V.E-124-07, 123-07 y los criterios del laboratorista a la hora de realizar el ensayo fueron:

1. Se prepara una mezcla homogénea, entre Cal y agente dispersante (hexametáfosfato sodio) la cual peso 35g.
- 2.

*Figura 27. Muestra Cal.*



Fuente: Autor.

3. Se coloca en un cilindro, los 35g de mezcla homogénea entre Cal y agente dispersante, a la cual se le agrego agua destilada hasta llenarlo a un litro. Al mismo tiempo se llena un segundo cilindro con agua destilada a la altura de un litro, donde se encuentra el Pario. Este procedimiento debe estar sobre una superficie plana, donde no se generen vibraciones que influyan, en las mediciones de la muestra.

*Figura 28. Muestra Cal a dentro de la maquina PARIO*



Fuente: Autor.

4. Se le da inicio al sistema o software y a continuación se toma el cilindro que tiene la mezcla de la punta, el cual se agita en forma horizontal vigorosamente por 60 segundos, este tiempo va a estar controlado por el sistema, el cual no lo muestra en la pantalla del computador. Al terminar ese tiempo se coloca en la posición inicial.

*Figura 29. Análisis de la Maquina PARIO*



Fuente: Autor.

5. se saca el Pario del cilindro con agua destilada, colocándolo en posición de 45° para que active la detección automática del dispositivo en el control Pario. El tiempo desde el final de la mezcla hasta la inserción final de PARIO, no debe exceder los 30 s.

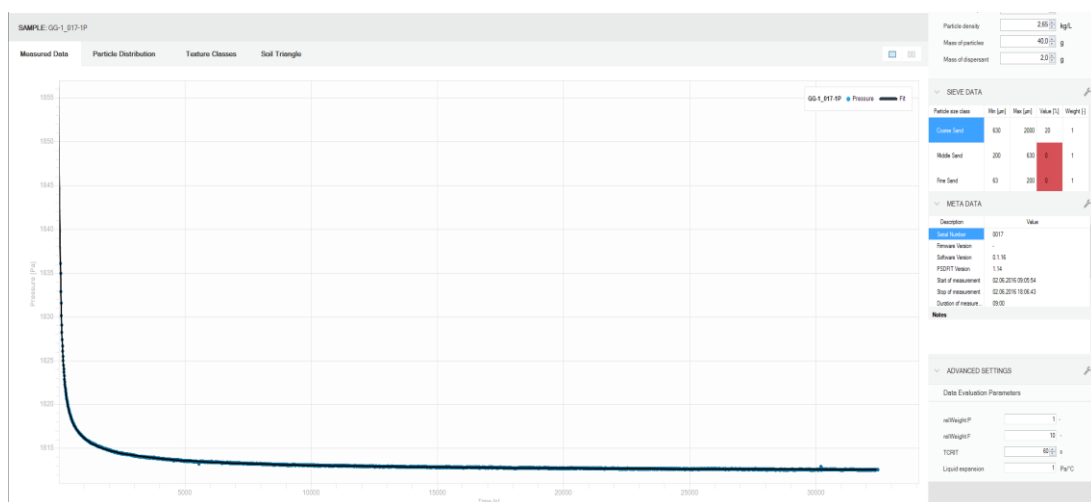
Luego se inserta en la suspensión, verificando que el borde del Pario esté de color azul, lo cual indica que se ha iniciado la medición. El tiempo de espera es de 24 horas para que se registren los datos esperados.

Como resultado el software nos muestra lo siguiente:

### 4.2.1. Evaluación Y Exportación De Datos

Los datos de medición muestran los datos registrados de presión y / o temperatura en función del tiempo. El eje del tiempo se puede alternar entre lineal y logarítmico. Los datos se pueden mostrar todos o en una cantidad reducida ("logarítmica", "potencia"). Después de ajustar la disminución de presión, adicionalmente la línea ajustada se muestra en superposición a los datos.

Figura 30. Análisis del software del Sistema PARIO.

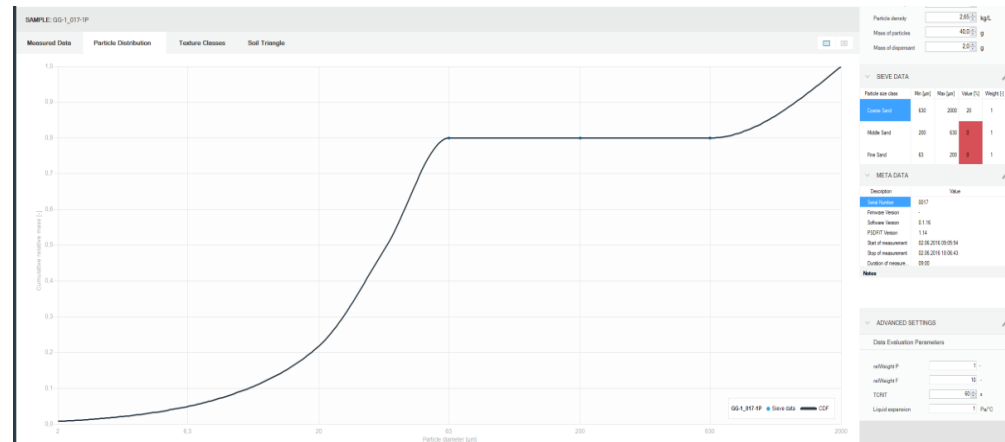


Fuente: Autor.

## 4.2.2. Distribución De Partículas

Esta ventana muestra el resultado del análisis en forma de PSD acumulativa, que está disponible después de ajustar los datos. **IMPORTANTE:** la PSD acumulativa total solo es correcta, si se han insertado las fracciones de tamiz adecuadas en la ventana de datos correspondiente antes del ajuste.

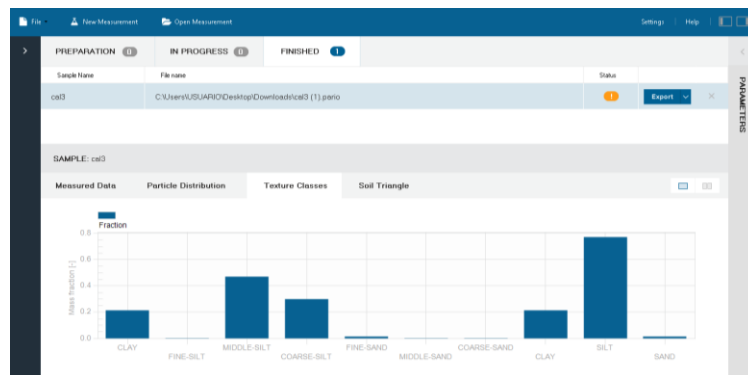
*Figura 31. Distribución de partículas Software PARIO.*



Fuente: Autor.

## 4.2.3. Clase de texturas

*Figura 32. Diagrama de Barras Clasificación de muestra cal.*

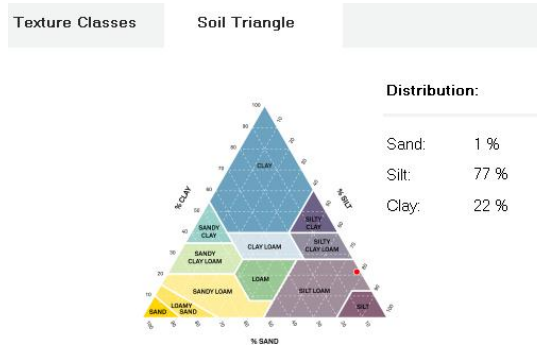


Fuente: Autor



## Triángulo de suelo

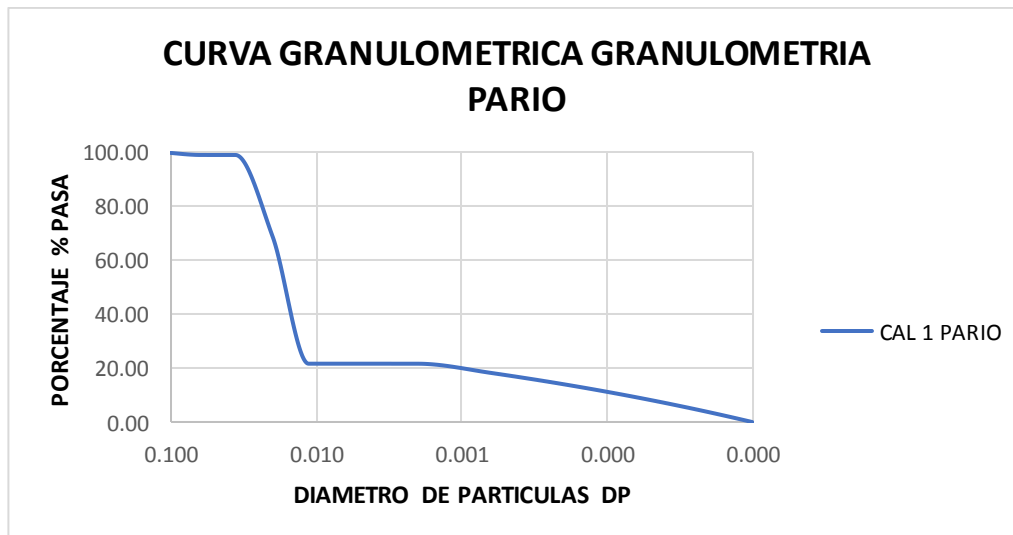
Figura 33. Triángulo de Suelo



Fuente: Autor.

Los datos de medición registrados y los resultados de las pruebas, se guardan y almacenan automáticamente después de cada medición realizada, en el directorio especificado en los archivos especificados. Los nombres de archivo están compuestos por el nombre principal especificado, por el usuario y un nombre de archivo genérico que termina (". den") en un formato binario. Estos pueden ser exportados por programas de hoja de cálculo como MS-Excel.

Grafica 1. Curva Granulométrica Muestra No 1.

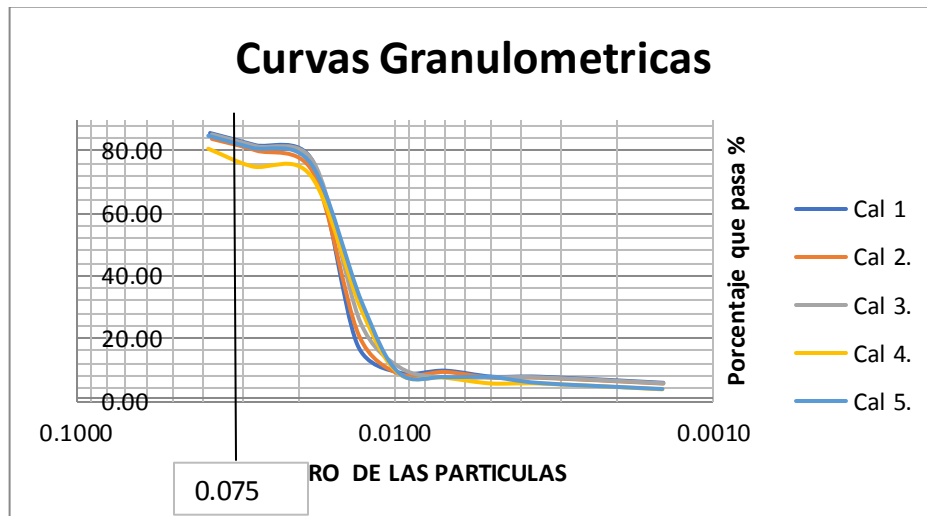


Fuente: Autor.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. RELACIÓN DE GRAFICAS MÉTODO TRADICIONAL POR HIDROMETRO

*Grafica 2. Relación de gráficas.*



Fuente: Autor.

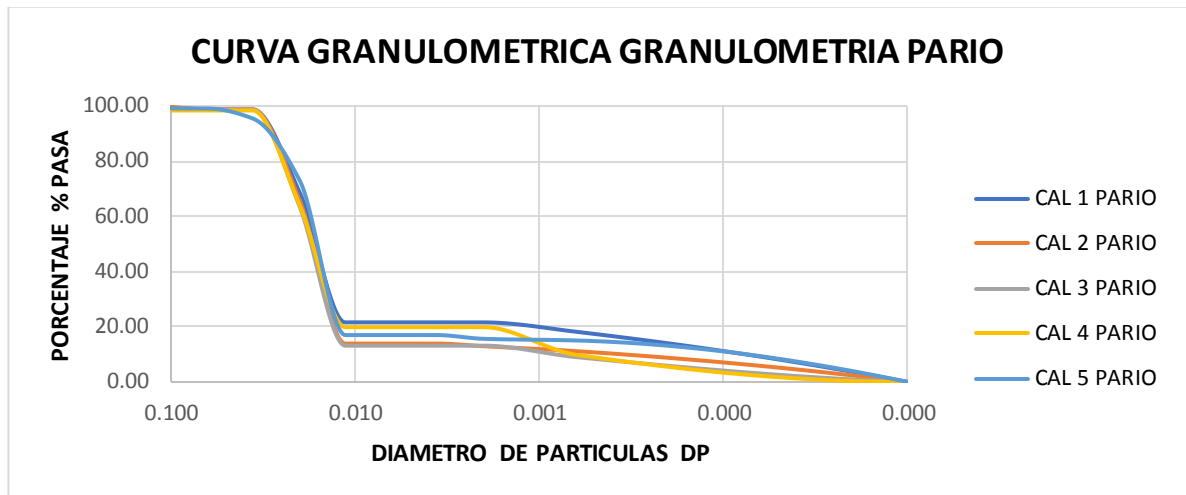
La relación de graficas permite ver el comportamiento que tuvo cada una de las muestras, teniendo como tendencia la misma trayectoria sin mayores alteraciones, lo cual refleja el buen procedimiento en cada uno de los elementos y de las muestras trabajada en el laboratorio.

### 5.1. RELACIÓN DE GRAFICAS MAQUINA PARIO

Pario es un sistema automatizado para el análisis del tamaño de partículas (PSA) para suelos y sedimentos. La distribución del tamaño de partícula (PSD) de los materiales granulares se obtiene mediante el método de sedimentación, que identifica específicamente las fracciones de limo con diámetros hidrodinámicos entre 63  $\mu\text{m}$  (límite superior de tamaño) y 2  $\mu\text{m}$  (límite inferior de tamaño). La fracción de arcilla se calcula restando las fracciones de arena medidas externamente y la fracción de limo de la cantidad total de material utilizado en el

análisis. Los datos para las fracciones de arena son proporcionados por un análisis de tamiz. Preferiblemente, este análisis se obtiene de forma independiente el cual se ve reflejado en las siguientes tablas:

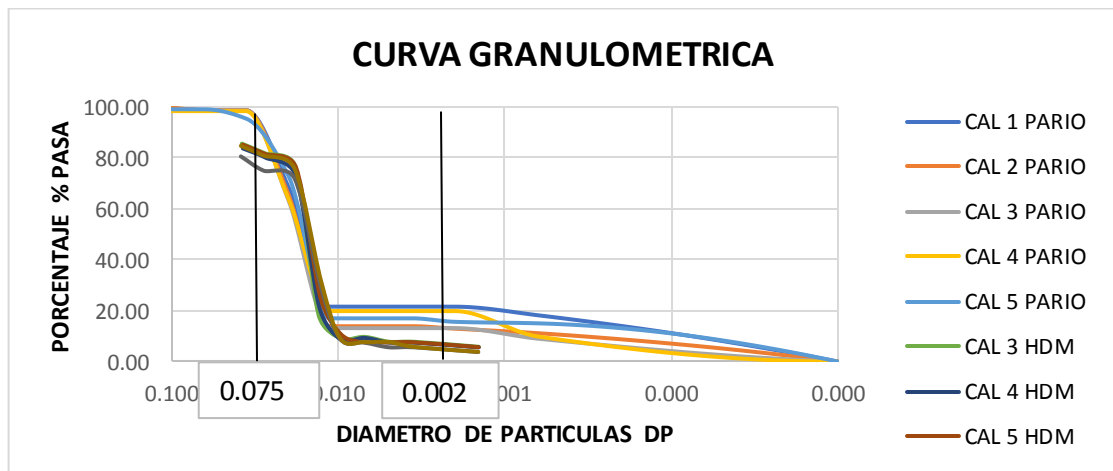
*Grafica 3. Curva Granulométrica Sistema PARIO.*



Fuente: Autor.

### 5.1.2 GRAFICA COMPARACION DE RESULTADOS SISTEMA PARIO VS MÉTODO TRADICIONAL POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO

*Grafica 4. Curva Comparativa de ambos sistemas*



Fuente: Autor.

En esta gráfica se ve reflejado los rangos de materiales; las partículas que están entre 0.075 y 0.002, se encuentran los limos. Hacia la derecha de 0.002 arcillas y a la izquierda de 0.075 arenas. Esto evidencia que la muestra de suelo (Cal), se compone en su mayor parte de limos.

### **5.1.3 DIFERENCIAS ENTRE LOS DOS METODOS**

El método del hidrómetro ha sido introducido e investigado a fondo por Casagrande [1934], nos permite reflejar la combinación de tamizado, el cual es aceptado internacionalmente como metodología de referencia para el análisis del tamaño de partículas. Este método consiste en medir la densidad de partículas en una capa pequeña a una profundidad, en ciertos momentos. Este método está bien establecido y ha sido ampliamente documentado durante más de medio siglo. [Día, 1965; Gee y Bauder, 1986; Smith y Mullins, 2000; Gee y O, 2002; Bowman et al., 2002; Kroetsch y Wang, 2008; ISO 11277, 2009; DIN 18123, 2011; Becher, 2011]. Por lo cual se permite evaluar por estos métodos como son: el método tradicional y el método Pario, y ver su comportamiento (Grafica 9.). Determinado sus distintas diferencias. Una de ellas y tal vez la más importante en el método tradicional. Es la necesidad de repetidas lecturas manuales. (Método del hidrómetro) en tiempos predefinidos, haciendo que los métodos sean muy laboriosos y que requieren operadores capacitados. Además, cada inserción del hidrómetro conduce a un levantamiento de la suspensión y puede causar alteraciones en el proceso de asentamiento en los datos finales. La evaluación depende de la simplificación de supuestos como la linealidad. Esto hace que sea deseable reemplazarlos con una metodología totalmente automatizada, como es el método Pario la cual nos muestra en la (Grafica 9.). La continuidad de datos tomados en el laboratorio, reflejando el comportamiento de aquellas partículas más finas que se van sedimentando en el proceso, lo que lleva a Curvas PSD precisas y continuas, en el sentido de que no se ve afectado por errores de operación y Perturbaciones por lecturas o muestreos.

#### **5.1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

##### **SITEMA PARIO**

- Una desventaja que tiene el sistema Pario, es que para realizar varios ensayos de Hidrómetro al mismo tiempo, se debe contar con un sistema (Pario) para cada proceso, lo cual aumentaría el costo del ensayo considerablemente.
- Otra desventaja de este sistema es que no es académico, esto quiere decir que no se ve reflejado los cálculos, que se generan en el sistema para realizar la gráfica, ya que todo es sistematizado.
- Una ventaja es que es muy fácil de manipular, siempre y cuando se siga el correcto procedimiento con todas sus especificaciones.
- Otra ventaja es que al ser sistematizado, no es necesario que se tenga personal las 24 horas que dura el proceso, ya que su memoria va almacenando todos los resultados, los cuales se van a ver reflejados al momento de la culminación del ensayo.

##### **METODO DEL HIDROMETRO**

- Una desventaja es que depende totalmente de la experiencia y buen manejo del laboratorista durante todo el proceso, teniendo en cuenta el tiempo de durabilidad del ensayo.
- Otra desventaja con respecto al Pario, es que sus resultados se ven reflejados después de un tiempo determinado el cual no es exacto, dejando unos intervalos sin mostrar el comportamiento de las partículas, al inicio y al final del ensayo como nos muestra claramente la (Grafica 9).
- Una ventaja de este método es que permite realizar varios ensayos al mismo tiempo, teniendo varios recipientes. Con el hidrómetro lo va sumergiendo en cada una de las muestras patrón, tomando sus medidas,

limpiándolo de manera adecuada, para obtener varios resultados de manera simultánea.

- Otra ventaja es que nos muestra como actúa la ley de Stokes, en las partículas esféricas, moviéndose con velocidades muy bajas, Lo cual son conceptos que si hay que tener muy claros a la hora de realizar estos ensayos.

## **6. RECOMENDACIONES**

En la presente investigación se logró constatar que para generar resultados efectivos y de mayor eficacia, en cada uno de los sistemas en comparación, es pertinente, tener en cuenta una debida ejecución del procedimiento de muestreo.

Por lo cual, para el caso del sistema tradicional por el método del hidrómetro es pertinente que el personal esté capacitado, en elementos de investigación del método y principalmente basados en la norma. Mitigando la probabilidad de valores incorrectos y que estos se propaguen en los cálculos y su respectivo procedimiento y análisis.

En el caso, del sistema PARIO se deben resaltar dos aspectos, uno de ellos es la temperatura ambiente en la cual se debe realizar este muestro técnico y la segunda es el usos de espacios adecuados; en donde los resultados no se vean afectados por vibraciones del entorno, teniendo en cuenta que estos estudios no se pueden dar en lugares abiertos.

## **7. CONCLUSIONES**

En el análisis de micropartículas, se evidencio un comportamiento similar de resultados. La diferencia principal entre los sistemas fue que en este caso el proceso del Sistema PARIO. Asintiendo un muestreo minucioso de partículas más pequeñas, y resaltando aquellas que tomaron mayor tiempo de sedimentación; las cuales el método tradicional no alcanza a evidenciar en sus resultados.

Por lo anterior y posteriormente de la comparación de la Curva Granulométrica, se concluyó que para indicar cuál de los dos sistemas permite la obtención de mayor información del material en estudio, se debe resaltar que los dos métodos tienen un procedimiento efectivo que permite aglomerar la información necesaria para lograr estandarizar el proceso de sedimentación de cada partícula.

Teniendo en cuenta que, La CAL es un material de adición que se utiliza para mejorar propiedades como; el suelo, las mezclas asfálticas, y también se pueden ver en concretos, por lo cual estos ensayos nos permiten entender mucho mejor el comportamiento de este tipo de material, siendo el suelo unos de los factores importantes a tener en cuenta en la ingeniería Civil.



## 8. REFERENCIAS

- ASTM D 422-63, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM International* [en línea], vol. D422-63, no. Reapproved 1998, pp. 1–8. ISSN <null>. DOI West Conshohocken, PA. Disponible en: [papers2://publication/uuid/32E2AE22-8555-4A27-B8B6-F7217202A1F2](https://doi.org/10.1520/D422-63R1998).
- CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, 1969. Ley 5 de 1969 Nivel Nacional. *Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.* [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1571>.
- CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, 1997. Ley 388 de 1997 Nivel Nacional. *Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.* [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=339>.
- CONSTRUDATA, 2018. Historia de los agregados. [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <http://www.construdata.com/VitrinaComercial/Anuncian/8/86000980/Capitulos/09/09.htm>.
- CORTE CONSTITUCIONAL DE COLOMBIA, 1991. CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA 1991 Actualizada con los Actos Legislativos a 2016. *Corte Constitucional de Colombia* [en línea], DOI 42867930. Disponible en: [http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion politica de Colombia.pdf%0Ahttp://es.wikisource.org/wiki/Constitución\\_de\\_Colombia\\_de\\_1991](http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion_politica_de_Colombia.pdf%0Ahttp://es.wikisource.org/wiki/Constitución_de_Colombia_de_1991).
- DURNER, W., IDEN, S.C. y VON UNOLD, G., 2017. The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. *Water Resources Research* [en línea], vol. 53, no. 1, pp. 33–48. ISSN 19447973. DOI 10.1002/2016WR019830. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/2016WR019830>.
- FAROUGHI, S.A. y HUBER, C., 2016. A theoretical hydrodynamic modification on the soil texture analyses obtained from the hydrometer test. *Géotechnique*, vol. 66, no. 5, pp. 378–385. ISSN 17517656. DOI 10.1680/jgeot.14.P.267.
- GABRIELS, D. y LOBO L., D., 2003. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, pp. 37–48. DOI 10.1109/PERCOM.2009.4912847.
- GONZÁLES C, S., 2007. Historia de la Ciencia del Suelo. 2ª parte El nacimiento de la moderna Edafología. *Madrid Blogs* [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/27/64513>.

- GONZÁLEZ, R.P.M., CORONADO, G., ACOSTA, N., MEDINA GONZÁLEZ, H., GARCÍA CORONADO, J. y NÚÑEZ ACOSTA, D., 2007. El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* [en línea], vol. 16, no. 3, pp. 19–24. ISSN 1010-2760. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216305>.
- INVIAS, I.N. de V., 2007. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO I.N.V. E – 124 – 07. *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras* [en línea], vol. 100, pp. 20. Disponible en: [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma INV E-124-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma INV E-124-07.pdf).
- JUÁREZ BADILLO, E. y RICO RODRÍGUEZ, A., 1967. *Mecánica de suelos*. S.l.: Limusa. ISBN 9789681800697.
- METER GROUP, I.U., 2018. AUTOMATED PARTICLE SIZE ANALYSIS. *METER Environment* [en línea]. Disponible en: <https://www.metergroup.com/environment/products/pario/>.
- MILLER, A., PERTASSEK, T., STEINS, A., DURNER, W., GÖTTLEIN, A., PETRIK, W. y VON UNOLD, G., 2017. The new PARIO TM device for determining continuous particle-size distributions of soils and sediments. *Geophysical Research Abstracts* [en línea], vol. 19, pp. 1. DOI 10.1002/2016WR019830. Disponible en: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-16452-1.pdf>.
- RAE, 2017. Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. [en línea]. [Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?w=diccionario>.
- ROBINSON, J.E., SUTTON, C.M. y REID, G.F., 2014. Dilute Triton X-100 in water as a reference liquid for hydrometer calibration using Cuckow's method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [en línea], vol. 57, pp. 132–137. ISSN 02632241. DOI 10.1016/j.measurement.2014.08.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.001>.
- TAVERA MENDOZA, H.C., 2011. GRANULOMETRIA DE SUELOS. [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/57876312/GRANULOMETRIA-DE-SUELOS>.
- ZALAZAR, G., 2015. Análisis Granulométrico. [en línea]. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/263413955/Analisis-Granulometrico>.

## 9. ANEXOS

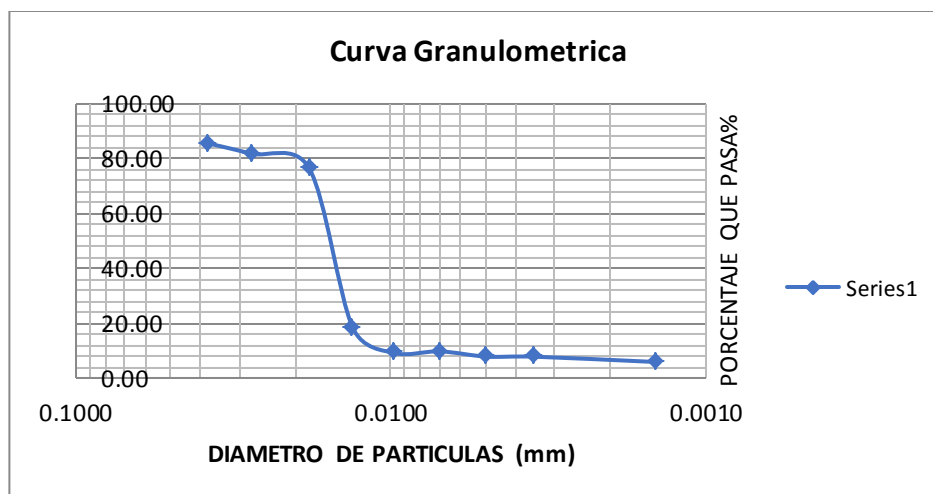
### 1. Resultados muestreos Curvas Granulométricas Método Del Hidrómetro

Las gráficas mostradas a continuación, reflejan el comportamiento del porcentaje de materiales finos, arcillas, limos, arenas que tiene la muestra. Se muestra la relación entre el porcentaje de suelo y el logaritmo del diámetro medio de partícula para cada uno de los puntos ensayados.

#### 1.1. Muestra No 1. ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA		CAL1									
HIDROMETRO	152 H										
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO										
TAMAÑO MAXIMO											
CILINDRO	1000ml										
RECIPIENTE #	121										
PESO RECIPIENTE (g)	112,83										
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	170,90										
PESO SUELO SECO + SOLUCION	58,07										
PESO SUELO SECO W0											
TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA	
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%	
0										100	
1	23	53	8	0,9	9,9	44,1	7,60	0,01381	0,0381	85,59	
2	23	51	8	0,9	9,9	42,1	7,90	0,01381	0,0274	81,71	
5	22	48	8	0,6	9,6	39,4	8,40	0,01397	0,0181	76,47	
15	22	18	8	0,6	9,6	9,4	13,30	0,01397	0,0132	18,24	
30	21	13	8	0,3	9,3	4,7	14,20	0,01414	0,0097	9,12	
60	20	13	8	0	9	5	14,20	0,01431	0,0070	9,70	
120	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0049	7,76	
240	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0035	7,76	
1440	20	11	8	0	9	3	14,50	0,01431	0,0014	5,82	
Cm	1										
Gs	2,51										
ALFA	1,030										
W0	53,07										

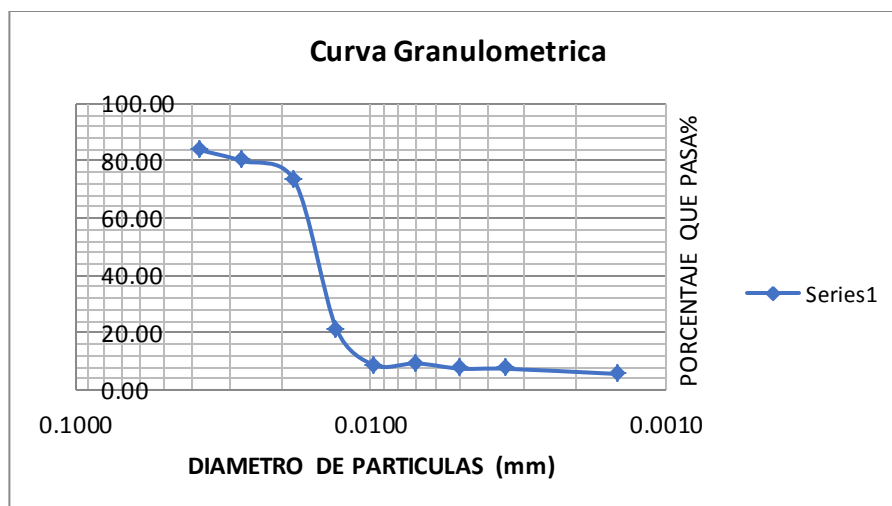
### 1.1.1. Curva Granulométrica



### 1.2. Muestra No 2. ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA		CAL2								
HIDROMETRO	152 H									
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO									
TAMAÑO MAXIMO										
CILINDRO	1000ml									
RECIPIENTE #	2									
PESO RECIPIENTE (g)	101,81									
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	162,30									
PESO SUELO SECO + SOLUCION	60,49									
PESO SUELO SECO W0	55,49									
TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	54	8	0,9	9,9	45,1	7,40	0,01381	0,0376	83,71
2	23	52	8	0,9	9,9	43,1	7,80	0,01381	0,0273	80,00
5	22	48	8	0,6	9,6	39,4	8,40	0,01397	0,0181	73,13
15	22	20	8	0,6	9,6	11,4	13,00	0,01397	0,0130	21,16
30	21	13	8	0,3	9,3	4,7	14,20	0,01414	0,0097	8,72
60	20	13	8	0	9	5	14,20	0,01431	0,0070	9,28
120	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0049	7,42
240	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0035	7,42
1440	20	11	8	0	9	3	14,50	0,01431	0,0014	5,57
Cm	1									
Gs	2,51									
ALFA	1,030									
W0	55,49									

### 1.2.1. Curva Granulométrica



### 1.3. Muestra No 3. ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA		CAL3								
HIDROMETRO	152 H									
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO									
TAMAÑO MAXIMO										
CILINDRO	1000ml									
RECIPIENTE #	39									
PESO RECIPIENTE (g)	119,85									
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	179,40									
PESO SUELO SECO + SOLUCION	59,55									
PESO SUELO SECO W0	54,55									
TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	54	8	0,9	9,9	45,1	7,40	0,01381	0,0376	85,16
2	23	52	8	0,9	9,9	43,1	7,80	0,01381	0,0273	81,38
5	22	49	8	0,6	9,6	40,4	8,30	0,01397	0,0180	76,28
15	22	22	8	0,6	9,6	13,4	12,70	0,01397	0,0129	25,30
30	21	14	8	0,3	9,3	5,7	14,00	0,01414	0,0097	10,76
60	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0070	7,55
120	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0049	7,55
240	20	12	8	0	9	4	14,30	0,01431	0,0035	7,55
1440	20	11	8	0	9	3	14,50	0,01431	0,0014	5,66
Cm	1									
Gs	2,51									
ALFA	1,030									
W0	54,55									